



⑮ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENTAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 44 28 500 A 1**

⑤ Int. Cl.⁸:
H 04 R 1/32
H 04 R 1/40
// H 04 R 17/00

⑳ Aktenzeichen: P 44 28 500.0
㉔ Anmeldetag: 11. 8. 94
㉕ Offenlegungstag: 30. 3. 95

DE 44 28 500 A 1

③① Innere Priorität: ③② ③③ ③①
23.09.93 DE 43 32 429.0

㉚ Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

㉚ Erfinder:
Bartelt, Hartmut, Dr., 91056 Erlangen, DE; Bartosch,
Ekkert, 91052 Erlangen, DE; Krämmmer, Peter, Dr.,
91052 Erlangen, DE

⑤④ Ultraschallwandlerarray mit einer reduzierten Anzahl von Wandlerelementen

⑤⑦ Bei einem Ultraschallwandlerarray nehmen die Abstände seiner Wandlerelemente (T_{ij}) in Zellenrichtung (x-Richtung) und Spaltenrichtung (y-Richtung) von einem Symmetriezentrum (S) nach außen gemäß der Vorschrift ab, daß das Integral über eine bezüglich des Symmetriezentrums (S) gerade und streng monoton nach beiden Seiten fallende Funktion $f(x)$ bzw. $g(y)$ zwischen den Mittelpunkten (M_{ij}) benachbarter Wandlerelemente (T_{ij}) für jede Zeile bzw. Spalte konstant ist. Dadurch wird die Anzahl der Wandlerelemente (T_{ij}) verringert ohne eine wesentliche Verschlechterung der Strahlcharakteristik des Arrays.

DE 44 28 500 A 1

Die Erfindung betrifft ein Ultraschallwandlerarray.

In der medizinischen Ultraschalldiagnostik wird ein Raumgebiet des menschlichen Körpers mit Ultraschallpuls beschallt und aus den reflektierten Ultraschallechopuls wird von einer Signalverarbeitungseinheit ein Ultraschallbild aufgebaut, das einem zweidimensionalen (2-D) Schnitt durch den Körper entspricht. Zum Senden und Empfangen der Ultraschallpulse werden bislang hauptsächlich eindimensionale (1-D), insbesondere lineare Arrays von piezoelektrischen Wandlerelementen eingesetzt, die von einer elektronischen Steuerungseinheit mit vorgegebenen Phasenverzögerungen angesteuert werden. Mit solchen Phasenverzögert angesteuerten linearen Arrays können in einer von der Normalen zur Arrayoberfläche und der Längsrichtung des Arrays aufgespannten Ebene schwenkbare und fokussierbare Ultraschallstrahlen gesendet und empfangen werden. Der relativ zur Normalen gemessene Schwenkwinkel für den Ultraschallstrahl ist im allgemeinen um so größer, je kleiner die Wandlerelemente sind. Der Abstand der Wandlerelemente wird im allgemeinen gleichmäßig über das gesamte Array etwa gleich der Hälfte der Wellenlänge des Ultraschalls gewählt, um zusätzliche Beugungsmuster (Nebenkeulen) zu vermeiden, und beträgt beispielsweise bei einer Untersuchungsfrequenz von 3,5 MHz etwa 0,2 mm. Andererseits ist eine bestimmte Mindestlänge des linearen Arrays erforderlich, um eine hinreichende Schallamplitude und ein genaues Fokussieren des Strahls zu erreichen. Aus diesen beiden Forderungen des maximalen Abstands der Wandlerelemente und der Mindestlänge des Arrays folgt eine Mindestanzahl von typischerweise 64 Wandlerelementen für das Array, die nicht unterschritten werden sollte.

Neben 1-D-Arrays sind auch zweidimensionale (2-D), insbesondere matrixförmige Ultraschallwandlerarrays bekannt, die aus einzelnen, im allgemeinen rechteckigen Wandlerelementen aufgebaut sind. Matrixförmige Wandlerarrays sind beispielsweise aus DE-C-34 37 862 und der korrespondierenden US-Patentschrift 4 683 396 oder aus DE-A-37 33 776 und der korrespondierenden US-Patentschrift 4 801 835 bekannt. Steuert man nun die Wandlerelemente des Matrixarrays mit entsprechend vorgegebenen Phasenverzögerungen an, so kann man im Gegensatz zu den linearen Arrays einen nicht nur in einer, sondern in zwei Winkelrichtungen schwenkbaren und fokussierbaren Ultraschallstrahl erzeugen und detektieren. Man erreicht so eine höhere Bildauflösung. Um einen hinreichend großen Raumwinkelbereich mit dem Ultraschallstrahl durchfahren zu können, müssen in Analogie zu den linearen Arrays wieder die Bedingungen eines Maximalabstandes von typischerweise etwa 0,2 mm der Wandlerelemente voneinander und einer Mindestfläche (Apertur) des 2-D-Arrays von typischerweise etwa $20 \times 20 \text{ m}^2$ bei einem quadratischen Array, d. h. $N = M$, und 3,5 MHz Untersuchungsfrequenz erfüllt sein. Damit ist eine Mindestanzahl von Wandlerelementen auch für das 2-D-Array erforderlich, die beispielsweise $64 \times 64 = 4096$ betragen kann.

Probleme bereiten bei einer so großen Anzahl von Wandlerelementen und den erforderlichen kleinen Abmessungen die Herstellung und Kontaktierung der Wandlerelemente und auch die zum Übertragen der Steuersignale und der Bildsignale erforderliche Anzahl von Steuer- und Datenleitungen. Es sind daher Wege gesucht worden, wie man die Anzahl der Wandlerele-

mente verringern kann, ohne die Strahlcharakteristik des 2-D-Arrays wesentlich zu verschlechtern. Insbesondere sollen die Nebenkeulen (side lobes) des Ultraschalls im wesentlichen unterdrückt bleiben.

Aus "IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control", Vol. 38, No. 4, July 1991, Seiten 320 bis 333 ist eine Ultraschallwandlermatrix mit einer für die Kardiographie typischen quadratischen Apertur von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ und quadratischen, äquidistant angeordneten Wandlerelementen bekannt. Da der Abstand der Wandlerelemente kleiner ist als die halbe Wellenlänge, sind Nebenkeulen in der Strahlcharakteristik dieser Wandlermatrix praktisch vollständig unterdrückt. Ausgehend von dieser Ausführungsform einer Ultraschallwandlermatrix sind zwei Möglichkeiten bekannt, wie die Anzahl der Wandlerelemente reduziert werden kann. Bei der ersten Möglichkeit werden die in den Ecken der Matrix liegenden Wandlerelemente entfernt, so daß ein Wandlerarray mit kreisförmiger Apertur mit einem der Seitenlänge des ursprünglichen Quadrats entsprechenden Durchmessers entsteht. Die Abstände der Wandlerelemente bleiben dabei gleich, so daß die Nebenkeulen weiterhin unterdrückt sind. Jedoch wird die Hauptkeule etwas breiter. Die zweite Möglichkeit besteht darin, aus dem Matrixarray durch eine statistische Auswahl Wandlerelemente zu entfernen. Dadurch vergrößert sich der mittlere Abstand der Wandlerelemente, und die Intensität der Nebenkeulen steigt mit abnehmender Anzahl von in dem Array verbliebenen Wandlerelementen. Außerdem sinkt die Leistung des Wandlerarrays.

Aus der US-Patentschrift 2 928 068 ist ein Druckwellenwandler mit einem massiven Keramikkörper bekannt. Auf einander gegenüberliegende Flächen des Keramikkörpers sind Elektroden so angeordnet, daß zwischen den Elektroden unterschiedlich piezoelektrisch aktivierte Bereiche entstehen. Der Polarisationsgrad dieser Bereiche nimmt vom Zentrum des Keramikkörpers nach außen ab.

Aus "Journal of the Acoustical Society of America", Vol. 49, No. 5 (Part 2), May 1971, Seiten 1668 bis 1669 ist ein Ultraschallwandler mit einem massiven Quarzkörper bekannt. Durch eine besondere Elektrodenanordnung wird in den Quarzkörper eine Gaußverteilung der Amplitude des abgestrahlten Ultraschallstrahls mit Maximum in der Mitte des Quarzkörpers erzeugt.

Aus der DE-C-33 34 090 und der korrespondierenden US-Patentschrift 4 518 889 ist ein Ultraschallwandlerarray mit stabförmigen, parallel angeordneten Wandlerelementen bekannt. Die Abstände der Wandlerelemente nehmen auf beiden Seiten eines Zentralpunkts oder einer Zentrallinie nach außen derart zu, daß die akustische Reaktion der wirksamen Oberfläche des Arrays und damit die Polarisation bei gleichmäßiger elektrischer Erregung mit größer werdendem Abstand vom Zentralpunkt oder von der Zentrallinie nach einer Gaußfunktion abnimmt.

Aus der US-Patentschrift 2 837 728 ist ein Ultraschallwandlerarray bekannt mit einer Vielzahl gleicher und gleichmäßig elektrisch erregter Wandlerelemente. Die Abstände der Wandlerelemente nehmen bei einem matrixförmigen Array von einer Zentrallinie als Symmetrieachse und bei einem kreisförmigen Array von einem Zentralpunkt nach außen hin zu gemäß der mathematischen Vorschrift

$$\text{Abstand} = K \cdot \sec(n \cdot \Theta)$$

wobei K eine Konstante, ϵ ein konstanter Winkel von etwa 10° und n die Anzahl der Wandlerelemente gerechnet von der Zentrallinie bzw. dem Zentralpunkt ist.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein Ultraschallwandlerarray anzugeben, bei dem die Anzahl seiner Wandlerelemente reduziert ist im Vergleich zu einem Array mit gleicher Fläche und äquidistanter Belegung mit Wandlerelementen und bei dem zugleich die Strahlcharakteristik nicht wesentlich verschlechtert ist.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung gelöst mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Die Abstände der Wandlerelemente in jeder Zeile (x-Richtung) nehmen nach außen monoton ab gemäß der Vorschrift:

- a) es ist eine bezüglich eines Symmetriezentrums (S) mit den Koordinaten $x = 0$ und $y = 0$ gerade und nach beiden Seiten monoton fallende Funktion $f(x)$ in x-Richtung vorgesehen;
- b) die x-Koordinaten der Mittelpunkte M_{ij} der Wandlerelemente T_{ij} in jeder Zeile sind derart gewählt, daß das bestimmte Integral der Funktion $f(x)$ über x zwischen den Mittelpunkten M_{ij} und M_{ij+1} benachbarter Wandlerelemente T_{ij} und T_{ij+1} wenigstens annähernd konstant ist.

In einer Formel läßt sich dies so ausdrücken:

$$\int_{x_{ij}}^{x_{ij+1}} f(x) dx \equiv \text{const.},$$

wenn x_{ij} die x-Koordinate des Mittelpunkts M_{ij} des Wandlerelements T_{ij} und x_{ij+1} die x-Koordinate des Mittelpunkts M_{ij+1} des Wandlerelements T_{ij+1} sind. Das bestimmte Integral

$$\int_{x_{ij}}^{x_{ij+1}} f(x) dx$$

entspricht der Fläche zwischen der Abszisse (x-Achse) und dem Graphen der Funktion $f(x)$ sowie den beiden durch $x = x_{ij}$ und $x = x_{ij+1}$ definierten Geraden. Das Ultraschallwandlerarray kann ein lineares Array mit nur einer Zeile oder auch ein zweidimensionales, insbesondere matrixförmiges, Array mit mehreren Zeilen sein.

Die Erfindung beruht dabei auf der Erkenntnis, daß die Empfindlichkeit des Arrays an seinem Rand durch die Variation der Mittelpunktabstände der Wandlerelemente gemäß der Erfindung herabgesetzt werden kann, ohne die Strahlcharakteristik wesentlich zu verschlechtern, d. h. ohne Nebenkeulen erheblich zu verstärken oder die Hauptabstrahlkeule wesentlich zu verbreitern.

In der Ausführungsform eines zweidimensionalen Arrays wächst vorzugsweise auch der Abstand der benachbarten Wandlerelemente in jeder Spalte (y-Richtung) monoton nach außen nach der gleichen Vorschrift wie in den Zeilen mit einer entsprechenden Funktion $g(y)$ für die Spalten, d. h.

$$\int_{y_{ji}}^{y_{ji+1}} g(y) dy \equiv \text{const.},$$

wenn y_{ji} die y-Koordinate des Mittelpunkts M_{ij} des Wandlerelements T_{ij} und y_{ji+1} die y-Koordinate des Mittelpunkts M_{ij+1} des Wandlerelements T_{ij+1} sind.

Als Funktion $f(x)$ und/oder $g(y)$ ist vorzugsweise eine Dreiecksfunktion, Hanning-, Hamming-, Riesz-, de la Vall-Puissin-, Tukey-, Bohman-, Poisson-, Hanning-Poisson-, Cauchy-, Gauß-, Doph-Chebyshev-, Kaiser-Bessel-, Barilon-Femes-, Exact Blackman-, Blackman-, Minimum 3-Sample-Blackman-Harris- oder Minimum-4-Sample-Blackman-Harris-Funktion vorgesehen. Diese Funktionen sind im Rahmen einer theoretischen Arbeit für die harmonische Spektralanalyse mittels diskreter Fouriertransformation in Anwendungen für die Signalerkennung bekannt ("Proceedings of the IEEE", Vol. 66, No. 1, Jan. 1 978, Seiten 51 bis 83). Die Fouriertransformierten dieser Funktionen weisen ausgeprägte Hauptkeulen und vergleichsweise kleine Nebenkeulen auf. Diese Eigenschaft wird in dieser vorteilhaften Weiterbildung gemäß der Erfindung für die Strahlcharakteristik ausgenutzt.

Die einzige Figur der Zeichnung zeigt ein Ausführungsbeispiel eines matrixförmigen Ultraschallwandlerarrays. Es ist ein Ausschnitt des Zentralbereichs einer solchen Wandlermatrix um ein Symmetriezentrum S schematisch dargestellt. Die Wandlerelemente sind mit T_{ij} bezeichnet und weisen vorzugsweise eine quadratische Gestalt auf. Mit den Wandlerelementen T_{ij} sind Zeilen i und Spalten j der $M \times N$ -Matrix gebildet mit $1 \leq i \leq M$ und $1 \leq j \leq N$, die in einem orthogonalen (x,y)-Koordinatensystem mit dem Ursprung S = (0,0) und einer x- und einer y-Achse liegen. Die Zeilen i verlaufen in x-Richtung und die Spalten j in y-Richtung. Die Ultraschallwandlermatrix kann quadratisch, d. h. die Anzahl M der Zeilen ist gleich der Anzahl N der Spalten, oder auch rechteckig sein, d. h. die Anzahl M der Zeilen ist verschieden zur Anzahl N der Spalten. Die Abstände der Mittelpunkte benachbarter Wandlerelemente, beispielsweise M_{ij} und M_{ij+1} , M_{ij+1} und M_{ij+2} sowie M_{ij+2} und M_{ij+3} , nehmen von innen nach außen immer weiter zu. Dazu wird eine Funktion $f(x)$ für die Zeilen i und eine Funktion $g(y)$ für die Spalten j gewählt, die jeweils bezüglich des Symmetriezentrums S gerade Funktionen sind, d. h. $f(x) = f(-x)$ bzw. $g(y) = g(-y)$ und für größer werdende Beträge $|x|$ bzw. $|y|$ streng monoton abnehmen. Damit sind diese Funktionen $f(x)$ und $g(y)$ Fensterfunktionen, die in diesem Ausführungsbeispiel bei einem einstellbaren Maximalwert $\pm x_{\max}$ bzw. $\pm y_{\max}$ verschwinden, d. h. $f(x_{\max}) = f(-x_{\max}) = 0$ bzw. $g(y_{\max}) = g(-y_{\max}) = 0$. Die Ränder der Fensterfunktionen $\pm x_{\max}$ bzw. $\pm y_{\max}$ können auch bei positiven oder negativen Funktionswerten liegen.

Vorzugsweise sind beide Funktionen f und g gleich, d. h. $f(z) = g(z)$ für ein reelles Argument z.

Das Symmetriezentrum S fällt in der dargestellten Ausführungsform mit dem Mittelpunkt M_{ij} des Wandlerelements T_{ij} zusammen, kann aber auch außerhalb der einzelnen Wandlerelementflächen liegen.

Aus der angegebenen Vorschrift für die Abstände der Mittelpunkte M_{ij} der Wandlerelemente T_{ij} folgt, daß wenigstens die Zahl N der Spalten j größer als 3 ist, und vorzugsweise auch die Zahl M der Zeilen i.

Die Variation der Abstände zwischen den Mittelpunkten M_{ij} der Wandlerelemente T_{ij} ist nur schematisch eingezeichnet und kann auch experimentell nachträglich etwas korrigiert werden.

Patentansprüche

1. Ultraschallwandlerarray mit wenigstens einer in einer x-Richtung verlaufenden Zeile (i) und mit in einer y-Richtung verlaufenden Spalten (j) von Wandlerelementen (T_{ij}), bei dem die Abstände zwischen den Mittelpunkten (M_{ij} und M_{ij+1}) benachbarter Wandlerelemente (T_{ij} und T_{ij+1}) in jeder Zeile (i) monoton nach außen zunehmen gemäß folgender Vorschrift:

- a) es ist eine bezüglich eines Symmetriezentrums (S) mit den Koordinaten $x = 0$ und $y = 0$ gerade und nach beiden Seiten monoton fallende Funktion $f(x)$ in x-Richtung vorgesehen;
- b) die x-Koordinaten der Mittelpunkte (M_{ij}) der Wandlerelemente (T_{ij}) in jeder Zeile (i) sind derart gewählt, daß das bestimmte Integral der Funktion $f(x)$ über x zwischen den Mittelpunkten (M_{ij} und M_{ij+1}) benachbarter Wandlerelemente (T_{ij} und T_{ij+1}) wenigstens annähernd konstant ist.

2. Ultraschallwandlerarray nach Anspruch 1, bei dem die Funktion $f(x)$ gewählt ist aus der Gruppe folgender Funktionen: Dreiecksfunktion, Hanning-, Hamming-, Riesz-, De la-Vall-Puissin-, Tukey-, Bohman-, Poisson-, Hanning-Poisson-, Cauchy-, Gauß-, Doph-Chebyshev-, Kaiser-Bessel-, Barilon-Femes-, Exact Blackman-, Blackman-, Minimum 3-Sample-Blackman-Harris- oder Minimum 4-Sample-Blackman-Harris-Funktion.

3. Ultraschallwandlerarray nach einem der Ansprüche 1 oder 2, bei dem die Abstände zwischen den Mittelpunkten (M_{ij} und M_{i+1j}) benachbarter Wandlerelemente (T_{ij} bzw. T_{i+1j}) auch in jeder Spalte (j) monoton nach außen zunehmen gemäß der Vorschrift:

- a) es ist eine bezüglich eines Symmetriezentrums (S) gerade und nach beiden Seiten monoton fallende Funktion $g(y)$ in y-Richtung vorgesehen;
- b) die y-Koordinaten der Mittelpunkte (M_{ij}) der Wandlerelemente (T_{ij}) in jeder Zeile (i) sind derart gewählt, daß das bestimmte Integral der Funktion $g(y)$ über y zwischen den Mittelpunkten (M_{ij} und M_{i+1j}) benachbarter Wandlerelemente (T_{ij} und T_{i+1j}) für jede Spalte (j) wenigstens annähernd konstant ist.

4. Ultraschallwandlerarray nach Anspruch 3, bei dem die Funktion $g(y)$ gewählt ist aus der Gruppe folgender Funktionen:

Dreiecksfunktion, Hanning-, Hamming-, Riesz-, De la-Vall-Puissin-, Tukey-, Bohman-, Poisson-, Hanning-Poisson-, Cauchy-, Gauß-, Doph-Chebyshev-, Kaiser-Bessel-, Barilon-Femes-, Exact Blackman-, Blackman-, Minimum 3-Sample-Blackman-Harris- oder Minimum 4-Sample-Blackman-Harris-Funktion.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

